

*На правах рукописи*



Трунов Антон Игоревич

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВКА ТОПЛИВОПОДАЮЩЕЙ  
АППАРАТУРЫ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ ПО КРИТЕРИЯМ  
ХАРАКТЕРИСТИК ИНДИКАТОРНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ**

Специальность 2.9.3 Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Хабаровск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тихоокеанский государственный университет» на кафедре «Двигатели внутреннего сгорания»

Научный руководитель: **Коньков Алексей Юрьевич**  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Юр Геннадий Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
"Сибирский государственный университет водного  
транспорта", профессор

**Тарута Виктор Федорович**  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО  
«Омский государственный университет путей  
сообщения», старший научный сотрудник

Ведущая организация: Акционерное общество «**Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава**» (АО «ВНИКТИ»)

Защита диссертации состоится «27» сентября 2022 г., в 15 часов 15 минут на заседании диссертационного совета 44.2.001.01 на базе ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» по адресу: Россия, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «ДВГУПС» (<https://www.dvgups.ru/>).

Отзыв по данной работе в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент  
e-mail: kabalyk@festu.khv.ru



Кабалык Юрий Сергеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Энергетическая стратегия холдинга РЖД предполагает снижение удельного расхода топлива поездами на дизельной тяге с 60,4 кг у.т./10 тыс. ткм брутто в 2020 г. до 55,6 кг у.т./10 тыс. ткм брутто в 2030 г. Достижение этих показателей требует комплексного подхода, включающего в числе прочих задач, обеспечение соответствия технического состояния дизеля исходным заводским параметрам.

Большинство тепловозных дизелей имеют топливopодaющую аппаратуру (ТПА) разделённого типа, которая требует не только стендовой регулировки в условиях локомотивного депо, но и проверки и, при необходимости, регулировки непосредственно на дизеле. Выборочная проверка 608 топливных насосов высокого давления (ТНВД) дизеля Д49 показала, что 33 % требуют регулировки угла опережения подачи топлива (УОПТ) и 25 % регулировки цикловой подачи (ЦП). Эксплуатация тепловозов с неоптимальным УОПТ приводит к ухудшению экологических и экономических показателей дизеля. Различия в УОПТ и ЦП между цилиндрами вызывают неравномерное распределение мощности между цилиндрами дизеля, что может приводить к возникновению чрезмерных механических и термических нагрузок на детали дизеля, и как следствие, к снижению эксплуатационной надёжности локомотива. Проблема обостряется для современных высокофорсированных дизелей тепловозов, обслуживающих поезда повышенной массы.

В соответствии со стратегией научно-технического развития холдинга РЖД (Белая книга) актуальность приобретают методы и средства диагностики, позволяющие на принципах разумной достаточности надёжно диагностировать различные неисправности дизеля, в том числе – нарушение регулировок ТПА.

Сказанное определяет актуальность работы, направленной на развитие методов диагностики, обеспечивающих возможность точной регулировки ТПА тепловозного дизеля в эксплуатации.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами диагностирования и регулировки поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и тепловозных дизелей в частности занимались многие ученые как в России, так и за рубежом. Значительный вклад в развитие средств и методов диагностики и регулировки ДВС в России внесли И.К. Андрончев, В.Н. Балабин, Р.М. Васильев-Южин, П.А. Васин, А.И. Володин, И.И. Габитов, А.Н. Головаш, В.В. Грачев, А.С. Гребенников, Л.В. Грехов, Н.С. Ждановский, А.Ю. Коньков, В.А. Лашко, М.И. Левин, Е.А. Никитин, А.В. Николаенко, Ю.П. Макушев, Д.Я. Носырев, А.А. Обозов, С.М. Овчаренко, А.С. Пунда, А.Э. Симсон, Л.Г. Соколев, А.Н. Соколенко, Л.В. Станиславский, В.Ф. Тарута, Э.А. Улановский, А.З. Хомич и другие. За рубежом развитием методов диагностирования ДВС занимались А. К. Antonopoulos, E. N. Balles, M. Brunt, K. M. Chun, J. A. Ekchian, J. A. Gatowski, J.B. Heywood, D. T. Hountalas, A.D. Kouremenos, V. T. Lamarinis, S. Leonhardt, C. Ludwig, J.M. Lujan, J. Martín, F. E. Nelson, R. Pawletko, F. Payri, S. Polanowski, C. Pond, R. Schwarz, P. Tunestal, K. Witkowski и другие.

Рекомендуемая заводом-изготовителем методика контроля и регулировки ТПА в условиях эксплуатации обладает высокой трудоемкостью и низкой

точностью. Характеристики тепловыделения ограниченно используются как источник дополнительной информации в системах диагностики судовых малооборотных дизелей. Известны работы, использующие характеристики тепловыделения в качестве обратной связи при управлении дизелем. Во всех случаях используются характеристики так называемого *индикаторного* (используемого, активного, нетто и др.) тепловыделения, упрощенно вычисляемые на основе первого закона термодинамики только по данным экспериментальной индикаторной диаграммы. При этом открытым остается вопрос влияния искажений, вносимых индикаторным каналом (краном), на результаты определения и диагностического анализа характеристик тепловыделения.

**Цель работы:** совершенствование методов технической диагностики и технического обслуживания тепловозного дизеля с использованием характеристик индикаторного тепловыделения в цилиндрах двигателя.

**Задачи исследования:**

1. На основе литературного обзора определить: перечень диагностических критериев, обеспечивающих возможность точной регулировки топливной аппаратуры; проблемы, препятствующие внедрению передовых методов диагностики и регулировки ТПА; структуру диссертации и стратегию исследования.

2. Разработать математическую модель процессов в индикаторном канале, учитывающую волновой характер распространения давления, а также ее программную реализацию.

3. Разработать методику компьютерного моделирования характеристик индикаторного тепловыделения в цилиндре тепловозного дизеля с различными параметрами технического состояния ТПА.

4. Выполнить расчетные исследования влияния регулировочных параметров технического состояния ТПА тепловозного дизеля на характеристику индикаторного тепловыделения, на основе которых предложить диагностические критерии для регулировки ТПА.

5. Разработать и экспериментально исследовать метод регулировки ТПА с использованием предложенных диагностических критериев, учитывающий возможную нестабильность режима дизеля при измерениях.

6. Выполнить экспериментальную проверку предлагаемых решений.

**Научная новизна**

1. Разработана математическая модель, описывающая волновой характер распространения давления в индикаторном канале тепловозного дизеля.

2. Предложены новые критерии оценки регулировочных параметров технического состояния ТПА тепловозного дизеля, определяемые на основе интегральной характеристики индикаторного тепловыделения.

**Теоретическая значимость** диссертационного исследования заключается в результатах расчетных и экспериментальных исследований, позволивших выявить взаимосвязи между регулировочными параметрами технического состояния ТПА и критериями, определяемыми по интегральным характеристикам индикаторного тепловыделения с искажениями, внесенными индикаторным каналом тепловозного дизеля.

### **Практическая ценность результатов работы**

Разработанный метод регулировки ТПА тепловозного дизеля позволяет достичь более высокой точности в сравнении с известными методами и снизить при этом трудоемкость регулировочных работ. Применение только двух датчиков давления для многоцилиндрового двигателя создает предпосылки для разработки недорогих и компактных средств диагностики, позволяя при этом учитывать нестабильность нагрузочного и скоростного режима двигателя при измерениях.

**Объектом исследования** является тепловозный четырёхтактный дизельный двигатель типа Д49. **Предмет исследования** – связь характеристик тепловыделения в цилиндрах дизеля, полученных при измерении давления через индикаторный канал, с регулировочными параметрами технического состояния топливоподающей аппаратуры.

**Методы исследования.** Расчетное исследование выполнено с использованием методов математического моделирования рабочих процессов двигателя и процессов в индикаторном канале. Моделирование рабочих процессов дизеля выполнялось с использованием программного комплекса «Дизель-РК», математическая модель процессов в индикаторном канале реализована в среде для технических расчетов Matlab. Основные результаты расчетных исследований и достоверность математической модели процессов в индикаторном канале проверялись в ходе натурных экспериментов.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель процессов в индикаторном канале дизеля.
2. Результаты расчётного и экспериментального исследования взаимосвязей между диагностическими критериями, определяемыми по характеристикам индикаторного тепловыделения, полученным в условиях эксплуатации, и регулируемым параметрами ТПА дизеля типа Д49.
3. Методика регулировки топливоподающей аппаратуры в условиях эксплуатации тепловозного дизеля.

**Достоверность результатов исследования** базируется: на всестороннем изучении выполненных ранее научно-исследовательских работ по теме исследования; использовании фундаментальных законов термо- и газодинамики и апробированном научно-методическом аппарате; согласованности результатов теоретических и экспериментальных исследований; наличии и объеме исходного материала и апробации результатов исследований.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены: на МНТК «Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы», (Комсомольск-на-Амуре, КНАГТУ, май 2015 г.); XIX краевой конференции молодых ученых и аспирантов Хабаровского края (Хабаровск, ТОГУ, январь 2017 г.); МНТК «Двигатель-2018» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, октябрь 2018 г.); МНК «Инновационные технологии развития транспортной отрасли» (Хабаровск, ДВГУПС, октябрь 2019 г.); ММК по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon» (Владивосток, ДВФУ, октябрь 2020 г.); МНПК «Наука и образование транспорту» (Самара, СамГУПС, ноябрь 2020 г.). Проект, разработанный на основе выполненного исследования, получил поддержку на конкурсе инновационных проектов «У.М.М.Н.И.К – 2017» (Хабаровск, октябрь 2017 г.).

Материалы диссертации опубликованы в 12 печатных работах, среди них 3 статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки, и 2 статьи в сборнике, входящем в международную систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 патент на полезную модель.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников и приложений. Объём диссертации составляет 163 страницы печатного текста, в том числе 54 рисунка, 7 таблиц, 4 приложения. Список литературы содержит 189 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, дана краткая характеристика работы.

**В первой главе** выполнен анализ современного состояния проблемы диагностирования и регулировки ТПА тепловозного дизеля. Определен перечень диагностических критериев, которые могут быть использованы для точной регулировки ТПА тепловозного дизеля. Показано, что известные методы регулировки не позволяют выполнять оперативную регулировку УОПТ и ЦП на двигателе с высокой точностью либо требуют наличия дорогостоящих датчиков давления, равного количеству цилиндров двигателя. Характеристики индикаторного тепловыделения получили ограниченное применение во многом из-за искажений, возникающих при измерении внутрицилиндрового давления через индикаторный канал.

На основании выполненного литературного обзора сформулированы цель и задачи исследования, которые определили структуру работы.

**Во второй главе** рассмотрены особенности математического моделирования характеристик индикаторного тепловыделения с учетом влияния индикаторного канала. В соответствии с расчетной схемой (рисунок 1) задача моделирования ставилась как расчет давления на выходе канала (преобразователь давления) на основании известных параметров рабочего тела на входе (камера сгорания).

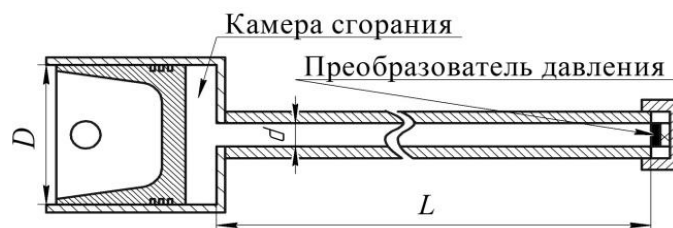


Рисунок 1 – Расчетная схема индикаторного канала

Давление в цилиндре определялось с помощью хорошо апробированной программы МГТУ им. Н.Э. Баумана «Дизель-РК». Математическая модель процессов в индикаторном канале строится на фундаментальных уравнениях газовой динамики. При разработке модели были приняты следующие допущения: среда представляет собой идеальный газ постоянной природы; течение в канале одномерное; вязкость газа проявляется только в пристеночном слое и учитывается по формуле Дарси-Вейсбаха; течение дозвуковое и адиабатическое; скорость звука в среде принята постоянной; процессы в индикаторном канале не оказывают влияния на процессы в цилиндре двигателя. С учетом перечисленных допущений систему

уравнений газовой динамики можно представить в виде неоднородного волнового уравнения, решение которого позволяет найти давление в любом сечении канала в любой момент времени.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\lambda}{a^2 d} |U| \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где  $x$  – координата по длине канала;  $t$  – координата времени;  $U$  – скорость потока;  $p$  – давление;  $d$  – диаметр индикаторного канала;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления единицы длины канала;  $a$  – скорость звука при параметрах в индикаторном канале.

Скорость звука определялась по известному уравнению для средней принятой температуры газа в канале:

$$a = \sqrt{kRT}, \quad (2)$$

где  $k$  – показатель адиабаты рабочего тела;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура газа в канале.

При наличии экспериментальной индикаторной диаграммы, измеренной через индикаторный канал, значение температуры может быть уточнено по частоте (периоду) колебаний на участке горения-расширения:

$$T = \left( \frac{4L}{\varphi_{\text{в}}} 6n \right)^2 \frac{1}{kR}, \quad (3)$$

где  $L$  – длина индикаторного канала;  $\varphi_{\text{в}}$  – период колебаний газа в индикаторном канале, в градусах;  $n$  – частота вращения коленчатого вала.

Решение уравнения (1) выполнялось численным конечно-разностным методом с первым порядком точности. При решении шаг по времени и длине индикаторного канала выбирался из условия устойчивости метода решения и определялся критерием устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви.

При решении уравнения (1) в начальный момент времени давление газа на открытом конце индикаторного канала и давление у датчика равно давлению в цилиндре. В ходе решения уравнения (1) давление на открытом конце индикаторного канала определяется как сумма приращения давления газа, поступающего из цилиндра, и давления газа в отраженной волне, подошедшей к открытому концу индикаторного канала в текущий момент времени. У датчика происходит полное отражение падающей волны (см. рисунок 1).

Программная реализация математической модели была выполнена в программном комплексе MatLab.

Верификация математической модели процессов в индикаторном канале реализована в ходе натурного эксперимента на одноцилиндровой установке 1ЧН 18/22 с одновременным измерением внутрицилиндрового давления в камере сгорания и через индикаторный канал длиной 225 и диаметром 6 мм.

Диаграмма давления, измеренная в цилиндре, использовалась в качестве исходных данных для расчета давления в конце канала. При настройке математической модели температура газа в индикаторном канале была определена по периоду колебаний давления  $\varphi_{\text{в}}$  на экспериментальной индикаторной диаграмме, с использованием соотношения (3). Коэффициент гидравлического сопротивления канала  $\lambda$  был принят равным 0,04.

Результаты сопоставления результатов измерения и расчета внутрицилиндрового давления при измерении через индикаторный канал показаны на рисунке 2. Расхождение между расчетной и экспериментальной диаграммами давления не превышает 6 %.

Расчет дифференциальной характеристики тепловыделения выполнялся на основе первого закона термодинамики, записанного в следующей форме:

$$\frac{dQ_i}{d\varphi} = \frac{k}{k-1} p \cdot \frac{dV}{d\varphi} + \frac{1}{k-1} V \cdot \frac{dp}{d\varphi}, \quad (4)$$

где  $V$  — объем цилиндра;  $\varphi$  — угол поворота коленчатого вала.

Интегральная характеристика индикаторного тепловыделения  $Q_i$  вычислялась путем интегрирования уравнения (4).

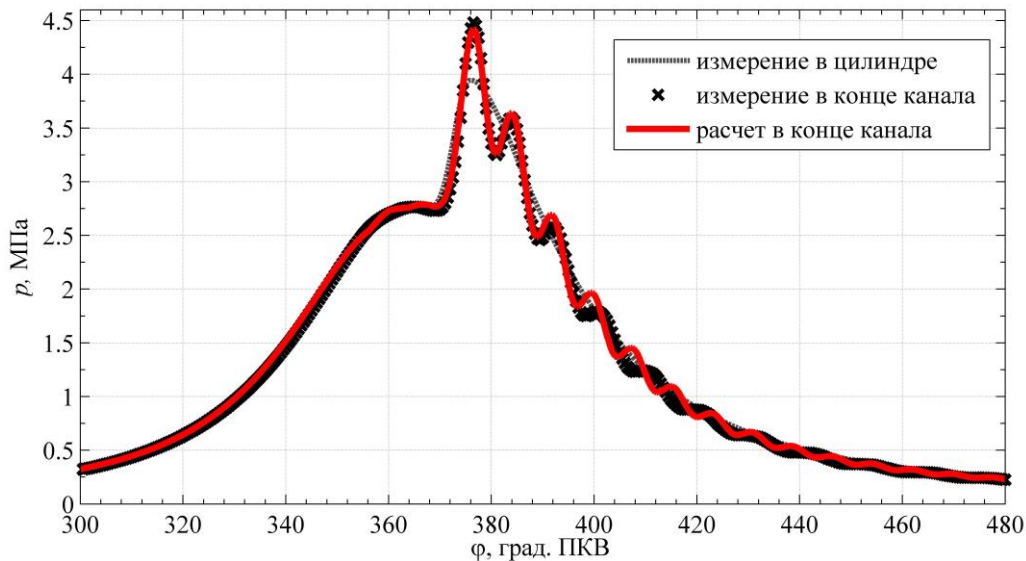


Рисунок 2 – Измеренные и расчетная диаграммы внутрицилиндрового давления при измерении через индикаторный канал

**Третья глава** диссертации посвящена расчетным исследованиям, направленным на поиск диагностических критериев для тонкой регулировки ТПА. Объектом исследования был выбран тепловозный двигатель 1А-5Д49.

В качестве возможных диагностических критериев рассматривался ряд известных критериев, а также предложенные новые критерии: прирост индикаторного тепловыделения за цикл  $\Delta Q_i$  и угол  $\varphi_{Q_x}$ , при котором выделяется некоторая доля теплоты  $x$  (рисунок 3). Исследования показали, что при оптимальном выборе доли  $x$  эти критерии меньше всего подвержены влиянию искажений, вносимых индикаторным каналом.

Установлено, что величина и характер вносимой ошибки зависят от размеров индикаторного канала и от характера протекания процесса сгорания, который может изменяться вследствие смены режима работы тепловоза и (или) ухудшения его технического состояния, в том числе нарушения регулировок ТПА. Поэтому доля теплоты  $x$ , при которой целесообразно определять угол  $\varphi_{Q_x}$ , может быть уточнена для конкретного двигателя и принятого режима двигателя при диагностических испытаниях. В выполненных расчетных и экспериментальных исследованиях использовался параметр  $\varphi_{Q_{10}}$ , т.е. угол, при котором выделяется 10 % от прироста тепловыделения  $\Delta Q_i$ .



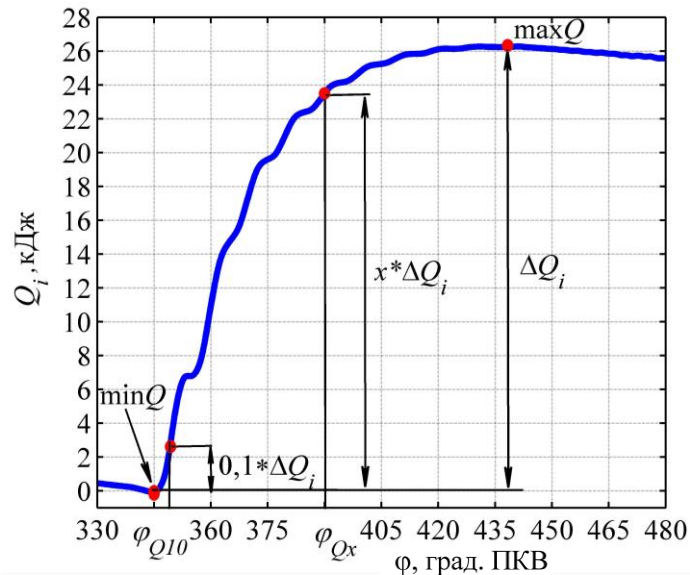


Рисунок 3 – К определению диагностических критериев:  $\min Q_i$ ,  $\max Q_i$  – минимальное и максимальное значение на интегральной характеристике индикаторного тепловыделения;  $\Delta Q_i$  – прирост индикаторного тепловыделения за цикл;  $\varphi_{Q10}$  – угол, при котором выделяется 10 % теплоты цикла

Помимо рассмотренного выше влияния индикаторного канала, на определение характеристик индикаторного тепловыделения оказывает влияние ряд известных погрешностей, имеющих место при измерении и анализе индикаторной диаграммы. Наибольшее влияние на величину предложенных критериев оказывают ошибки определения абсолютного давления  $\Delta p_a$  в цилиндре дизеля и положения верхней мертвой точки (ВМТ)  $\Delta \varphi_{\text{ВМТ}}$ . На каждый градус ошибки определения ВМТ приходится от 4 до 7,5 % ошибки при определении прироста тепловыделения. Влияние ошибки постоянной составляющей давления может достигать 10 % и более на каждый неучтенный бар. При экспериментальных исследованиях коррекция положения ВМТ и определение постоянной составляющей давления выполнялись известными расчетными методами.

Степень сжатия и изменение частоты вращения коленчатого вала в диапазоне допустимой погрешности объединённого регулятора мощности не оказывают влияния на предлагаемые критерии.

Значение показателя адиабаты  $k$ , входящего в уравнение (4), приводит к значительным количественным и качественным изменениям характеристик тепловыделения. Опираясь на термодинамический анализ уравнения (4), можно полагать, что выбор величины  $k$  позволяет опосредованно учесть потери выделившейся теплоты на теплообмен из-за утечек и т.п. При попарном сравнении характеристик, измеренных одновременно, изменения, связанные с величиной  $k$ , будут одинаковыми при равных  $k$  в каждом цилиндре. Это предположение справедливо при условии исправности газораспределительного, кривошипно-шатунного механизмов и системы охлаждения дизеля.

Варьирование проходного сечения распылителя форсунки в допустимых инструкцией по эксплуатации пределах (10 % от номинального) не оказывает заметного влияния на характеристики тепловыделения и, следовательно, на предлагаемые критерии. Ухудшение состояния распылителя, приводящее к снижению качества смесеобразования, также не вызывает значительного изменения

критериев  $\Delta Q_i$  и  $\varphi_{Q10}$ , но при этом изменяется наклон интегральной характеристики тепловыделения, что указывает на снижение скорости тепловыделения в фазе кинетического сгорания и позволяет использовать характеристики индикаторного тепловыделения для оценки технического состояния форсунок. В то же время среднее индикаторное давление  $p_{mi}$  при ухудшении качества смесеобразования заметно снижается, как и в случае уменьшения ЦП, поэтому использование параметра  $p_{mi}$  для оценки ЦП  $b_{ц}$  возможно только в случае нормального состояния форсунок.

Настройка ТПА на двигателе предполагает регулировку УОПТ  $\varphi_{опт}$  по критерию  $\varphi_{Q10}$  и ЦП  $b_{ц}$  по критерию  $\Delta Q_i$ . Важно, чтобы предложенные критерии адекватно реагировали на регулировочные воздействия. При оценке отклонения исследуемых параметров от опорных значений использовались приведённые значения. Приведение выполнялось по следующим формулам:  $\overline{\Delta Q_i} = \Delta Q_i^д / \Delta Q_i^{оп}$ ;  $\overline{b_{ц}} = b_{ц}^д / b_{ц}^{оп}$ ;  $\Delta \varphi_{QX} = \varphi_{QX}^д - \varphi_{QX}^{оп}$ ;  $\Delta \varphi_{опт} = \varphi_{опт}^д - \varphi_{опт}^{оп}$ , где индексом «д» и «оп» обозначены действительные и опорные значения параметра соответственно.

В ходе расчетного исследования варьировались ЦП  $b_{ц}$  топлива (пять значений в диапазоне  $\pm 10\%$  от опорного значения  $b_{ц}^{оп} = 0,835$  г) и УОПТ  $\varphi_{опт}$  (пять значений в диапазоне  $\pm 5^\circ$  поворота коленчатого вала (ПКВ) от опорного значения  $\varphi_{опт}^{оп} = 19^\circ$  до ВМТ).

На рисунке 4 отражено влияние фактического УОПТ  $\varphi_{опт}$  на интегральную характеристику индикаторного тепловыделения и угол, при котором выделяется 10 % теплоты,  $\varphi_{Q10}$ .

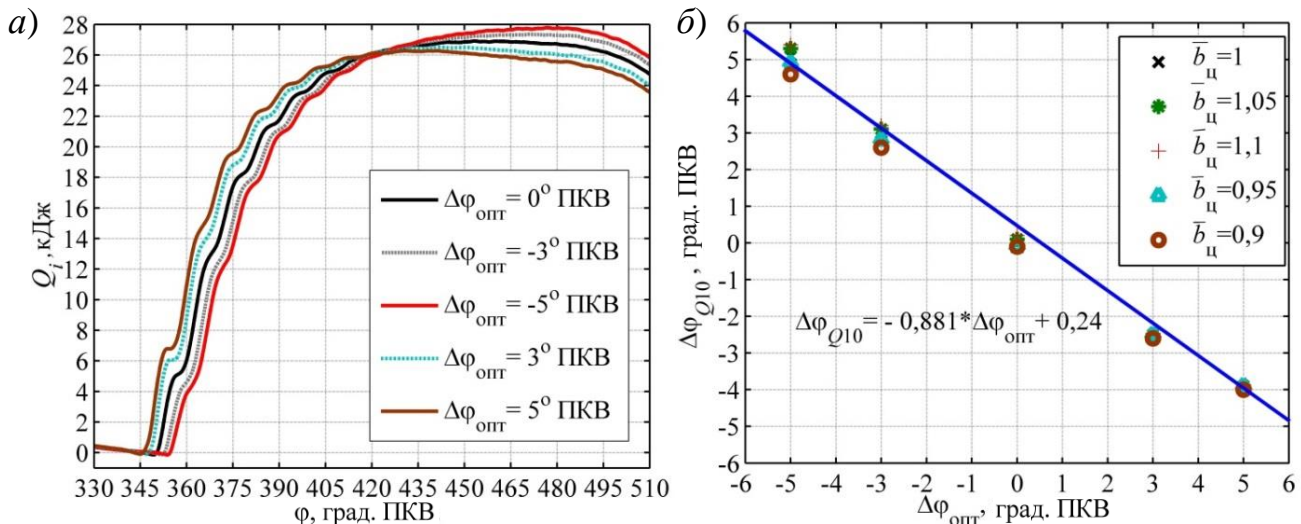


Рисунок 4 – Влияние фактического УОПТ на интегральную характеристику индикаторного тепловыделения и критерий  $\varphi_{Q10}$ : а – влияние  $\varphi_{опт}$  на интегральную характеристику индикаторного тепловыделения при  $b_{ц} = 0,835$  г; б – влияние  $\varphi_{опт}$  на угол, при котором выделяется 10 % теплоты цикла  $\varphi_{Q10}$  при разных  $b_{ц}$

Изменение УОПТ приводит к изменению критериев  $\varphi_{Q10}$  и  $\Delta Q_i$  (рисунок 4, а), поэтому при регулировке ТПА УОПТ необходимо регулировать в первую очередь. Видно, что связь между отклонениями УОПТ и отклонениями критерия  $\varphi_{Q10}$  может быть описана линейной зависимостью (рисунок 4, б), которая приближенно может быть заменена равенством

$$\Delta\varphi_{Q10} = -\Delta\varphi_{\text{опт}}, \quad (5)$$

при этом ошибка в оценке УОПТ  $\varphi_{\text{опт}}$  не превысит  $1^\circ$  ПКВ. Влияние ЦП  $b_{\text{ц}}$  на критерий  $\varphi_{Q10}$  незначительное (рисунок 4, б), изменение ЦП на 20 % приводит к изменению  $\varphi_{Q10}$  в пределах  $1^\circ$  ПКВ.

На рисунке 5 показаны результаты расчетного исследования влияния объема ЦП на критерии  $\varphi_{Q10}$  и  $\Delta Q_i$ . Изменение цикловой подачи топлива не приводит к изменениям угла  $\varphi_{Q10}$ , при этом величина прироста индикаторного тепловыделения  $\Delta Q_i$  изменяется пропорционально изменению ЦП  $b_{\text{ц}}$  (рисунок 5, б) и может быть описана уравнением

$$\overline{b_{\text{ц}}} = \overline{\Delta Q_i}. \quad (6)$$

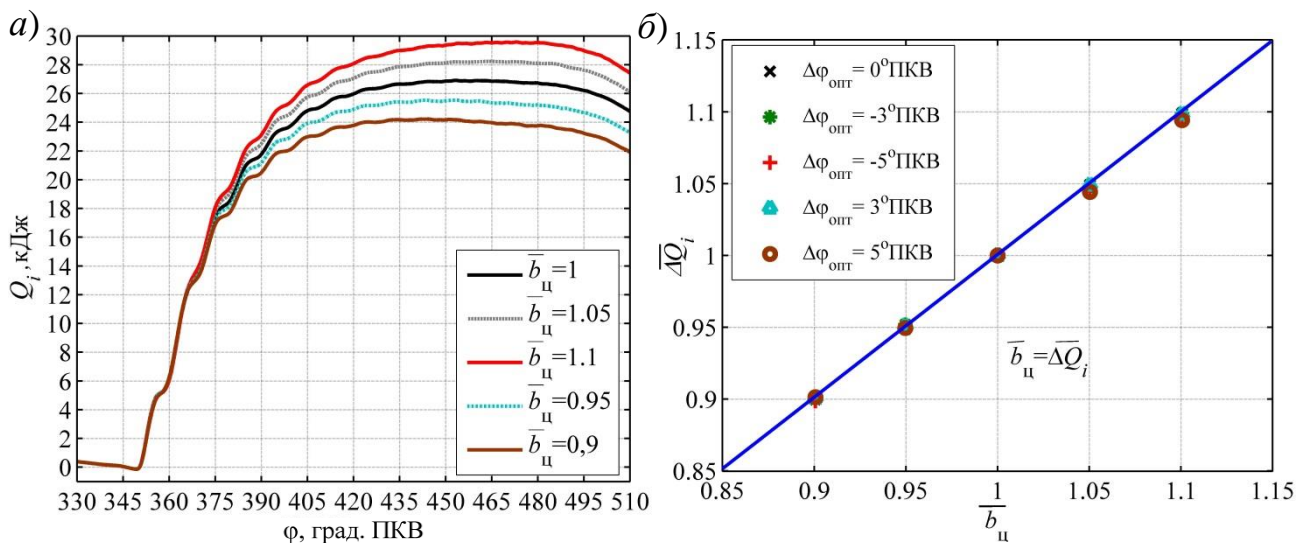


Рисунок 5 – Влияние ЦП на интегральную характеристику индикаторного тепловыделения и критерий  $\Delta Q_i$ : а – влияние  $b_{\text{ц}}$  на интегральную характеристику тепловыделения при  $\varphi_{\text{опт}}=19^\circ$  до ВМТ; б – влияние  $b_{\text{ц}}$  на прирост индикаторного тепловыделения  $\Delta Q_i$  при разных  $\varphi_{\text{опт}}$

Метод регулировки ТПА разрабатывался в рамках идеи его последующей практической реализации в составе компактного диагностического прибора, программное обеспечение которого должно оперативно (возможно, в режиме реального времени) определять критерии для регулировки УОПТ и ЦП. Его суть заключается в попарном, синхронном измерении диаграмм внутрицилиндрового давления с последующим сравнением критериев, определяемых по интегральным характеристикам индикаторного тепловыделения, полученным численным интегрированием уравнения (4). Учитывая полученные результаты можно предложить следующую последовательность регулировки УОПТ и ЦП многоцилиндрового дизеля.

### Методика регулировки УОПТ $\varphi_{\text{опт}}$

1. Выполнить попарное измерение диаграмм внутрицилиндрового давления во всех цилиндрах двигателя с корректировкой положения ВМТ и постоянной составляющей давления в цилиндре;
2. Вычислить интегральные характеристики индикаторного тепловыделения;
3. Определить критерий  $\varphi_{Q10}$  для всех цилиндров двигателя;

4. В ходе сравнительного анализа значений критерия  $\varphi_{Q10}$  во всех цилиндрах вычислить требуемые корректировки  $\Delta\varphi_{\text{опт}}$  для каждого цилиндра, используя соотношение (5);

5. Выполнить корректировку УОПТ в требующих этого цилиндрах, согласно инструкции по техническому обслуживанию двигателя;

6. Выполнить проверку регулировок п. 1–5. Если расхождение параметра  $\varphi_{Q10}$  между цилиндрами превышает  $1^\circ$  ПКВ, повторить операции по регулировке и проверке, начиная с п. 5.

### Методика регулировки ЦП $b_{\text{ц}}$

1. На основе сравнительного анализа интегральных характеристик тепловыделения, полученных в ходе проверки правильности регулировки УОПТ, выбрать опорный цилиндр, в котором значение критерия  $\Delta Q_i$  будет использоваться в качестве эталона;

2. На индикаторный кран цилиндра, выбранного в качестве опорного, установить первый датчик давления, показания с которого будут считаться опорными. Второй датчик установить на индикаторный кран регулируемого цилиндра;

3. Выполнить одновременное измерение диаграмм внутрицилиндрового давления в опорном и регулируемом цилиндрах с корректировкой положения ВМТ и постоянной составляющей давления в цилиндре;

4. Вычислить интегральные характеристики индикаторного тепловыделения;

5. Определить значения критерия  $\Delta Q_i$  в двух цилиндрах;

6. Определить величину и направление корректировки ЦП топлива в регулируемом цилиндре, используя соотношение (6);

7. Выполнить корректировку ЦП топлива в регулируемом цилиндре в соответствии с инструкцией по техническому обслуживанию двигателя;

8. Выполнить проверку регулировок по п. 3–6. Если расхождение критерия  $\Delta Q_i$  между цилиндрами больше 5 %, повторить операции п. 6–7.

Рассмотренные в работе методы обработки результатов измерения позволяют применять алгоритмы автоматического анализа для процедур корректировки положения ВМТ, постоянной составляющей давления, определения критериев и значений корректирующих воздействий.

**В четвёртой главе** диссертации описаны экспериментальные установки, приведены результаты экспериментальной проверки предлагаемых диагностических критериев и методики регулировки ТПА.

Экспериментальное исследование диагностических критериев выполнялось на исследовательской установке с двигателем 1ЧН 18/22. Крепление топливного насоса на двигателе выполнено таким образом, что можно контролируемо изменять УОПТ. Крышка цилиндра имеет места для одновременной установки двух датчиков давления, в том числе непосредственно в камеру сгорания двигателя. Важным условием проведения эксперимента являлось измерение давления в цилиндре через индикаторный канал длиной 250 мм и диаметром 8 мм. На рисунке 6 представлены результаты экспериментальных исследований взаимосвязи критерия  $\Delta Q_i$  и ЦП, выполненных в ходе испытания двигателя по нагрузочной характеристике при частоте вращения коленчатого вала  $700 \text{ мин}^{-1}$ . При расчете приведенных параметров за опорное значение ЦП было принято  $b_{\text{ц}}^{\text{оп}}=0,125 \text{ г}$ .

Из рисунка 6, б видно, что, как и в случае с результатами, полученными расчетным путём (рисунок 5, б), зависимость прироста индикаторного тепловыделения в цикле  $\Delta Q_i$  от ЦП является линейной и может быть заменена равенством (6).

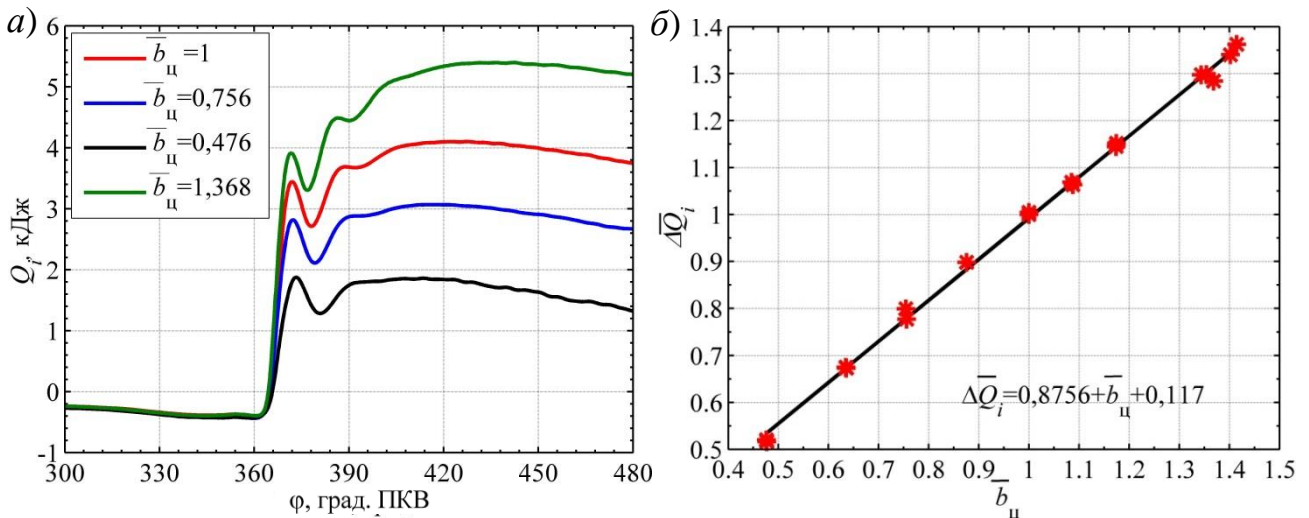


Рисунок 6 – Влияние ЦП на интегральную характеристику индикаторного тепловыделения и критерий  $\Delta Q_i$ : а – зависимость индикаторного тепловыделения от угла поворота коленчатого вала при различных ЦП; б – зависимость диагностического критерия  $\Delta Q_i$  от ЦП

На рисунке 7 показаны результаты экспериментальных исследований взаимосвязи фактического УОПТ с критериями  $\varphi_{Q5}$ ,  $\varphi_{Q25}$ ,  $\varphi_{Q50}$ ,  $\varphi_{Q75}$ . При проведении эксперимента УОПТ варьировался в диапазоне от  $-8$  до  $+5^\circ$  ПКВ относительно опорного значения  $\varphi_{\text{опт}}^{\text{оп}} = 24^\circ$  до ВМТ. Объём ЦП оставался неизменными за счет фиксации рейки ТНВД. Частота вращения коленчатого вала двигателя поддерживалась постоянной и равной  $700 \text{ мин}^{-1}$  за счет изменения нагрузки на двигатель.

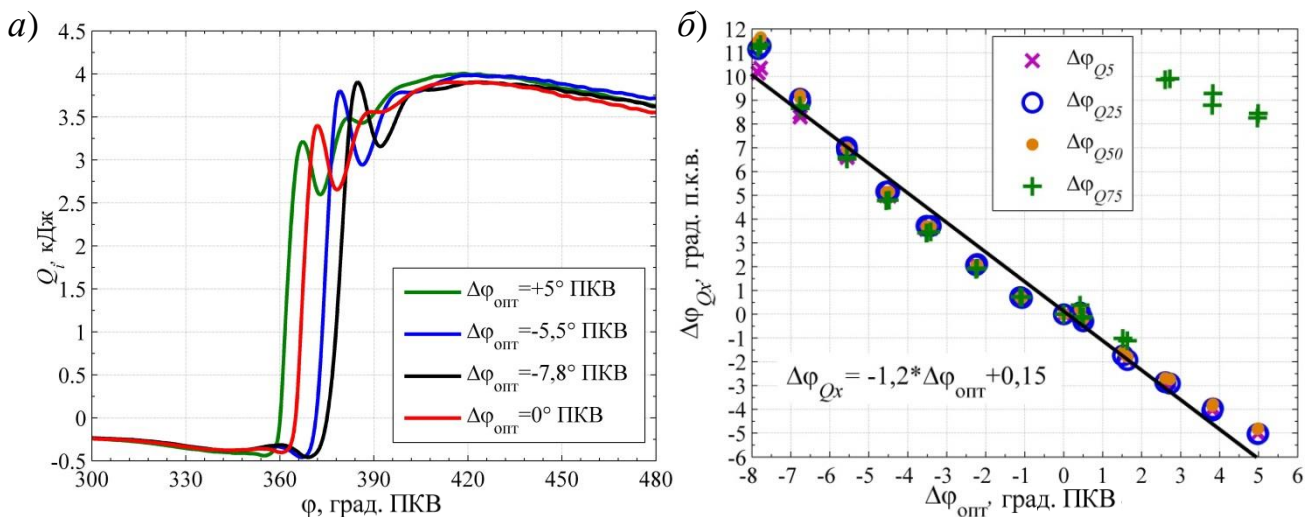


Рисунок 7 – Влияние УОПТ на интегральную характеристику индикаторного тепловыделения и критерии, определяемые на её основе: а – зависимость индикаторного тепловыделения от угла поворота коленчатого вала при различных УОПТ; б – зависимость диагностических критериев  $\varphi_{Q5}$ ,  $\varphi_{Q25}$ ,  $\varphi_{Q50}$ ,  $\varphi_{Q75}$  от УОПТ

На рисунке 7, б можно заметить несколько точек, которые не ложатся на аппроксимирующую линию, эти точки относятся к параметру  $\varphi_{Q75}$ . Они находятся на участке характеристики тепловыделения, где возникают осцилляции, вызванные

влиянием индикаторного канала. Критерии  $\varphi_{Q5}$ ,  $\varphi_{Q25}$ ,  $\varphi_{Q50}$  не имеют критичных выбросов и аппроксимируются линейной зависимостью, которая без значительной потери точности может быть заменена выражением (5).

Экспериментальная проверка методики регулировки ТПА выполнялась на дизельном двигателе 6ЧН 16/22,5. Двигатель имеет рядный механический насос с встроенным регулятором частоты вращения и штатно установленные индикаторные краны на каждом цилиндре. Исследования выполнялись на режиме частичного нагружения дизеля при частоте вращения коленчатого вала  $n=700\pm 20$  мин<sup>-1</sup> и эффективной мощности  $P_e=90\pm 3$  кВт.

Регулировка выполнялась согласно представленной выше методике.

На рисунке 8 показаны интегральные характеристики индикаторного тепловыделения, полученные для всех цилиндров двигателя до и после регулировки УОПТ. Видно (рисунок 8, б), что после регулировки сгорание во всех цилиндрах двигателя начинается в одной и той же фазе рабочего процесса, разброс угла  $\varphi_{Q10}$  не превышает 1° ПКВ. При этом имеют место значительные расхождения между цилиндрами в приросте индикаторного тепловыделения  $\Delta Q_i$ , что свидетельствует о различиях в ЦП.

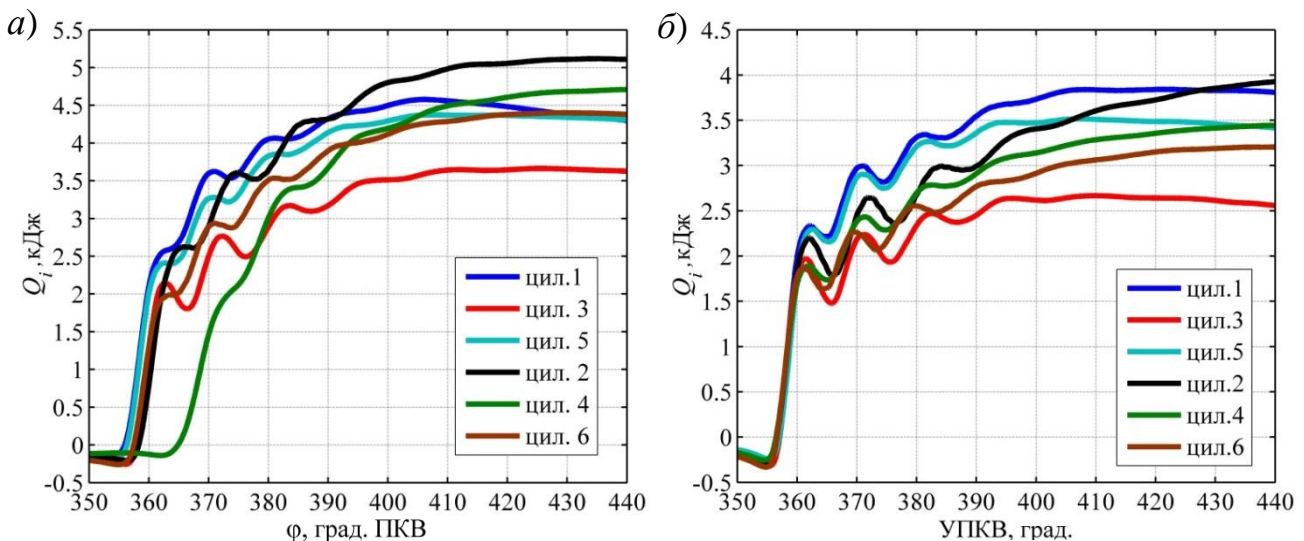


Рисунок 8 – Интегральные характеристики индикаторного тепловыделения:  
а – до регулировки УОПТ; б – после регулировки УОПТ

В ходе эксперимента установлено, что регулировка ЦП, по данным анализа одноцикловых диаграмм, невозможна из-за нестабильности рабочего процесса и беспокойной работы механического регулятора частоты вращения. Наиболее достоверные результаты были получены с отключенным регулятором при осреднении не менее 20 последовательных циклов.

В качестве примера, отражающего изменения характеристик тепловыделения при регулировке ЦП, на рисунке 9 показаны экспериментальные характеристики для пары цилиндров 2 и 5, где 5-й цилиндр считался опорным. Представленные характеристики тепловыделения получены путем осреднения характеристик по 50 последовательным циклам.

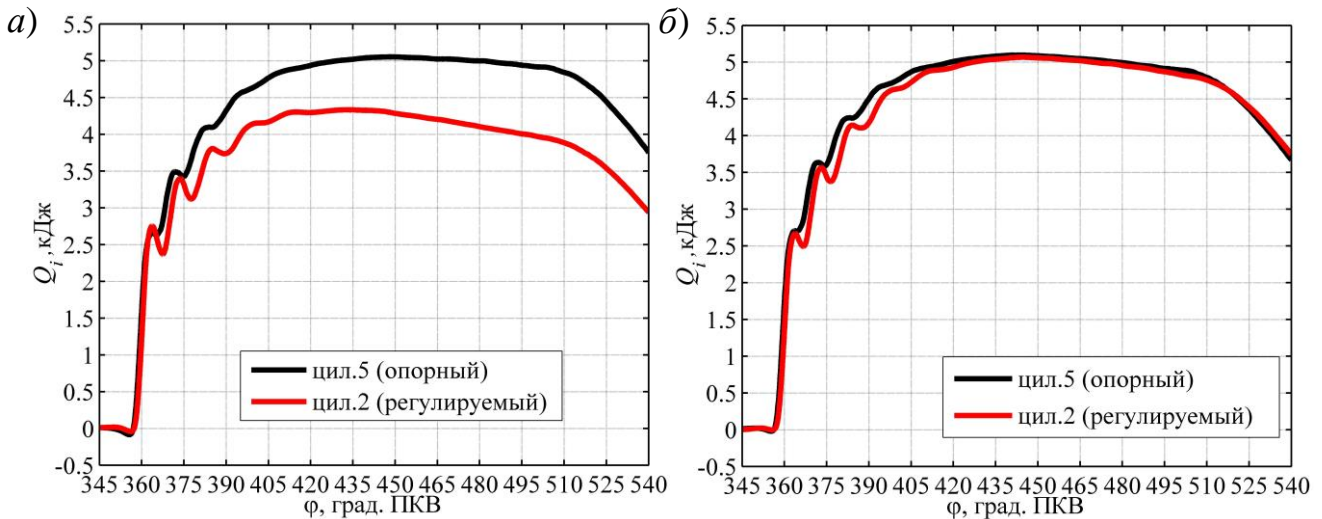


Рисунок 9 – Интегральные характеристики индикаторного тепловыделения во втором и пятом цилиндре: *a* – до регулировки ЦП; *б* – после регулировки ЦП

После регулировки ЦП в цилиндре 2 было выполнено сравнение предлагаемого критерия с критериями, получившими на сегодняшний день наибольшее распространение в эксплуатации (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение критериев

Критерий	Цилиндр 5 (опорный)		Цилиндр 2 (регулируемый)	
	до	после	до	после
$\Delta Q_i$ , кДж	5,09	5,09	4,34	5,06
$p_{max}$ , МПа	6,31	6,37	6,41	6,35
$T_{ог}$ , °C	310	310	295	300
$p_{mi}$ , МПа	0,6337	0,6418	0,5439	0,6248

При анализе данных таблицы 1 можно заметить, что в цилиндре 2, несмотря на увеличение ЦП, произошло снижение максимального давления сгорания после увеличения ЦП. Это объясняется изменением характера протекания процесса сгорания, в связи с чем изменилась и волновая картина процессов в индикаторном канале, что внесло искажения в результаты определения максимального давления сгорания на конце индикаторного канала. Изменение объёма ЦП мало повлияло на температуру отработавших газов цилиндра 2, что говорит о низкой чувствительности данного параметра. Можно отметить, что прирост индикаторного тепловыделения цикла  $\Delta Q_i$  хорошо согласуется со средним индикаторным давлением  $p_{mi}$ .

Для оценки влияния неисправностей топливной аппаратуры на диаграмму тепловыделения во второй цилиндр была установлена форсунка (8x0,4x140) с увеличенным до 0,4 мм диаметром распыляющих отверстий. Как и можно было предположить, увеличение диаметра отверстий с 0,25 мм до 0,4 мм нарушило ранее полученную регулировку (см. рисунок 9, б). Имеющееся при этом увеличение  $\Delta Q_i$  (рисунок 10, а) объясняется уменьшением гидравлического сопротивления распылителя при постоянном активном ходе плунжера.

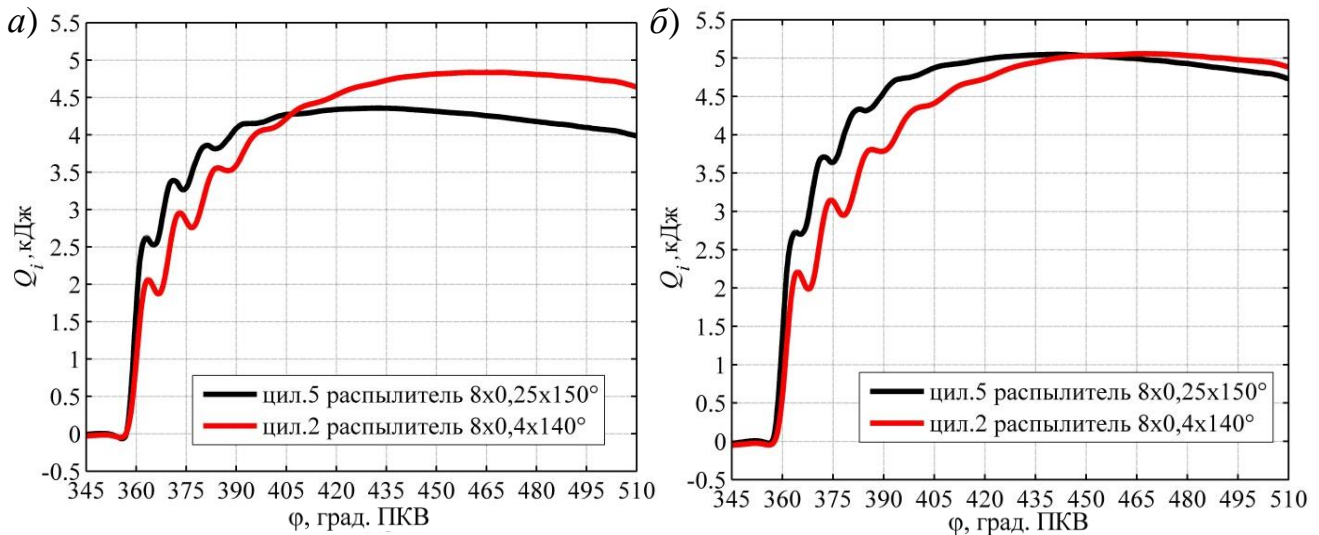


Рисунок 10 – Характеристики тепловыделения при неисправной форсунке во втором цилиндре:  
*a* – до регулировки ЦП; *б* – после регулировки ЦП

На рисунке 10, *б* отчетливо заметно снижение скорости тепловыделения в начальной (кинетической) фазе горения, что объясняется неизбежным увеличением среднего диаметра топливных капель, приводящим, в свою очередь, к уменьшению скорости образования паров топлива в индукционном периоде. Эта особенность сохраняется после регулировки ЦП по параметру  $\Delta Q_i$ . Результаты хорошо согласуются с данными, полученными в ходе расчетного эксперимента.

Вышеизложенное позволяет констатировать, что предложенный метод, наряду с хорошими свойствами по регулировке ТПА, обладает также возможностями по выявлению неисправностей, вызывающих ухудшение сгорания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационного исследования была достигнута поставленная цель и получены следующие научные и практические результаты.

1. Анализ существующих методов диагностирования и регулировки ТПА показал целесообразность проведения исследования характеристик индикаторного тепловыделения с целью их использования для тонкой регулировки ТПА тепловозного дизеля в условиях эксплуатации.

2. Разработана математическая и компьютерная модель процессов в индикаторном канале, позволяющая моделировать искажения, возникающие при измерении диаграммы внутрицилиндрового давления через индикаторный канал. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало, что расхождение давлений не превышает 6 %.

3. Предложена методика моделирования характеристик индикаторного тепловыделения, позволяющая учитывать влияние индикаторного канала.

4. Изучено влияние индикаторного канала совместно с возможными ошибками определения характеристик индикаторного тепловыделения на значения критериев, связанных с УОПТ и ЦП, по результатам которого предложены критерии:  $\varphi_{Q10}$  для контроля УОПТ и  $\Delta Q_i$  для оценки ЦП.

5. Для устранения существенного влияния ошибки положения ВМТ и постоянной составляющей внутрицилиндрового давления требуется выполнение корректировки этих параметров известными методами.



6. Разработана и экспериментально проверена методика регулировки ТПА, основанная на последовательном, попарном определении интегральных характеристик индикаторного тепловыделения, позволяющая выполнить регулировку УОПТ с точностью до 1° ПКВ и ЦП с точностью до 5% и допускающая непостоянство режима работы двигателя во время диагностического испытания.

7. Точная регулировка ЦП по одноцикловым характеристикам индикаторного тепловыделения невозможна вследствие особенностей работы регулятора частоты вращения и рабочего процесса дизеля, поэтому при выполнении регулировки ТПА рекомендуется отключать регулятор и усреднять интегральные характеристики индикаторного тепловыделения, как минимум, по 20 последовательным рабочим циклам.

8. Критерий  $\Delta Q_i$  в сравнении с общепринятыми критериями обладает более высокой чувствительностью к ЦП при меньшей чувствительности к качеству смесеобразования.

9. Теоретически и экспериментально доказана возможность применения интегральной характеристики индикаторного тепловыделения, полученной при измерении давления через индикаторный канал, для диагностирования неисправностей ТПА, приводящих к некачественному распыливанию и сгоранию топлива.

Дальнейшее развитие исследуемой темы возможно в направлении поиска новых критериев в характеристиках индикаторного тепловыделения, полученных по результатам измерения внутрицилиндрового давления в условиях эксплуатации, позволяющих выявить и локализовать неисправности ТПА, а также в направлении развития аппаратурных средств для получения и диагностического анализа характеристик индикаторного тепловыделения в режиме реального времени.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК РФ:

1. **Трунов, А. И.** Метод регулировки топливной аппаратуры тепловозного дизеля по характеристике тепловыделения в условиях эксплуатации / А. Ю. Коньков, А. И. Трунов, А. Д. Гурьянова // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2021. – № 80 (1). – С.20–29. doi: 10.217802223-9731-2021-80-1-20-29.

2. **Трунов, А. И.** Математическая модель процессов в индикаторном канале тепловозного дизеля / А. И. Трунов, А. Ю. Коньков // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. – № 1 (85). – С. 80–87.

3. **Трунов, А. И.** Экспериментальное исследование метода регулировки топливной аппаратуры дизеля по характеристикам индикаторного тепловыделения / А. Ю. Коньков, А. И. Трунов // Транспорт Урала. – 2021. – № 4(71). – С. 66–73. doi: 10.20291/1815-9400-2021-4-66-73.

*Статьи в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus*

4. **Trunov, A.** Improving the Accuracy of Determining the In-cylinder Pressure of a Diesel Engine When Measured Through an Indicator Channel / A. Konkov, A. Trunov // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in

Intelligent Systems and Computing, vol 1115. Springer, Chamhttps. doi: 10.1007/978-3-030-37916-2\_30.

5. **Trunov, A. I.** Method for Adjusting the Fuel Injection System of a Diesel Engine Using In-Cylinder Pressure Measured through the Indicator Channel / A. Y. Konkov, A. I. Trunov // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, 2020, pp. 1–5. doi:10.1109/FarEastCon50210.2020.9271549.

Зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2018618355. «Моделирование газодинамических процессов в индикаторном канале поршневых машин» / **Трунов А. И.**, Коньков А. Ю.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ТОГУ. – №2018615250; заявл. 24.05.2018; зарег. 11.07.2018.

7. Патент № 209779 Российская Федерация, МПК G01L 23/10 (2006.01), СПК G01L 23/10 (2021.08). Устройство для одновременного измерения давления и скорости изменения давления в цилиндре поршневого двигателя внутреннего сгорания : № 2021120220 : заявлено 08.07.2021 : опубл. 23.03.2022 / **Трунов А. И.**, Коньков А. Ю. ; заявитель ФГБОУ ВО ТОГУ – 7 с.

Публикации в других изданиях:

8. **Трунов, А. И.** Выбор фазового критерия сгорания по индикаторной диаграмме в системах управления дизелем / А.Ю. Коньков, А.И. Трунов // Фундаментальные исследования океанотехники и морской инфраструктуры: Теория. Эксперимент. Практика : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Комсомольск-на-Амуре : Изд-во Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, 2015. – С. 157–160.

9. **Трунов, А. И.** Повышения достоверности диагностики двигателя внутреннего сгорания по результатам измерения индикаторной диаграммы / А.И. Трунов // Молодые ученые - хабаровскому краю : материалы XIX краевого конкурса молодых ученых и аспирантов (г. Хабаровск, 13-20 января 2017 г.). – Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2017. – С. 196–201.

10. **Трунов, А. И.** Численное исследование влияния индикаторного канала на результаты обработки индикаторной диаграммы дизеля Д49 / А. Ю. Коньков, А. И. Трунов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. – 2018. – № 2. – С. 140–143.

11. **Трунов, А. И.** Исследование влияния индикаторного канала на точность измерения давления в цилиндре ДВС / А. И. Трунов, А. Ю. Коньков, Г. Б. Горелик // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Двигатель-2018», посвященной 150-летию основания факультета «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана / сост. В. А. Зенкин, Л. Л. Мягков. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – С. 18–27.

12. **Трунов, А. И.** Влияние погрешностей измерения индикаторной диаграммы на оценку распределения мощности между цилиндрами тепловозного дизеля / А. Ю. Коньков, А. И. Трунов, А. Д. Гурьянова // Наука и образование транспорту : материалы XIII Международной научно-практической конференции. – Т. 1. – Самара : СамГУПС, 2020. – С. 50–54.

ТРУНОВ Антон Игоревич

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВКА ТОПЛИВОПОДАЮЩЕЙ  
АППАРАТУРЫ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ ПО КРИТЕРИЯМ  
ХАРАКТЕРИСТИК ИНДИКАТОРНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ**

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_.\_\_.\_\_\_\_. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Гарнитура «Times New Roman»

Усл. печ. л. 1,22. Тираж 100 экз. Заказ №\_\_

Отдел оперативной полиграфии  
издательства Тихоокеанского государственного университета  
680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136

